第1章 システム設計とマイクロプロセッサ

── 4004の登場からシステムLSIの普及まで

藤村雅史

ここでは，マイクロプロセッサの応用の歴史を振り返る．最初のマイクロプロセッサである4004の登場以来，しばらくは汎用計算機やパソコンの心臓部として活用されてきた．その後マイクロプロセッサの有用性が認められ，組み込み機器でも使われるようになった．最近では，ほとんどすべてのシステム機能を一つのLSIで構成できるようになっている．このようなシステムLSIと呼ばれるデバイスでは，マイクロプロセッサ・コアが活用されている．（編集部）

本誌の読者でマイクロプロセッサやマイコン（マイクロコントローラ）ということばを知らない方はいないでしょう．1971年に米国Intel社が4004を発表してから35年が経過しようとしています．現在のマイクロプロセッサは，周辺I/Oやメモリを1チップに集積しています．特定用途向けの場合は，システムLSIやSOC（system on a chip）と呼ばれています．処理性能やボード/チップという実現手段に違いはあるものの，マイコン・システムの構成としては当初から基本的に違いはありません．大きく変わったのは，昔はコンピュータ＝計算機だったのが，現在ではマイコンを核とした組み込みと呼ばれるアプリケーション分野が形成されていることです．制御機器のみならず，ディジタル家電機器など，さまざまな用途でマイコンが使われるようになっています．

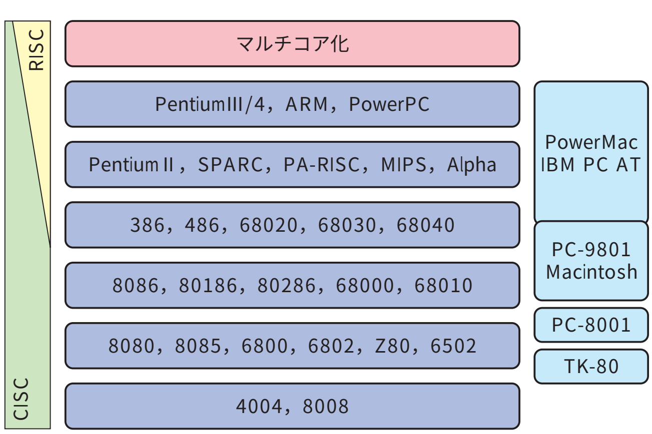


図1　マイコンの世代分類

アーキテクチャや機能で大まかに分類した．時系列で見るとかならずしも正確ではないので注意してほしい．

● パソコンとともに発展

組み込み機器は，パソコンの後を追いかけるように発展してきました．パソコンの発展経緯は，組み込み機器やそこで使われるマイコンの歴史を知るうえでたいせつです．そこで日本国内でのパソコンの発展経緯を，筆者の経験を交えながら簡単にまとめてみます．

図1にマイコンの世代分類とその世代を代表するパソコンを示します．時系列で見るとかならずしも正確ではありませんが，アーキテクチャや機能で大まかに見た場合，だいたいこのように分類できると思います．

4ビットで登場したマイクロプロセッサは，すぐに8ビットの時代を迎えました．米国Intel社の「8080」，米国Motorola社（現Freescale Semiconductor社）の「6800」，米国Zilog社の「Z80」，米国MOS Technology社の「6502」などです．

マイクロプロセッサの種類が増えてくると，8080やZ80が「80系」，6800や6502が「68系」と分類され，ユーザも2分化するようになりました．マイクロプロセッサの老舗はIntel社とMotorola社でしたが，パソコンへの搭載はZ80と6502が主流でした．6502は，米国Apple社の「Apple II」に代表される米国製パソコンの多くに搭載されていました．また，任天堂の「ファミリーコンピュータ」に搭載されたのは，当時のマニアならだれもが記憶に留めていることでしょう．

Motorola社の製品が使われたのは，「究極の8ビット・マイコン」と呼ばれる「6809」が発表されてからであり，Intel社に至っては16ビットの時代になってからでした．

筆者がマイクロプロセッサを知ったのは，1976年夏に日本電気（NEC）が発売した「TK-80」（当時88,500円）でした．8080Aのアセンブリ言語で書かれたプログラムや，ユニバーサル・エリアへ追加するオーディオ・インターフェースなど，それまでとはまったく違うディジタルという世界にたいへん興味を持ちました．

マイクロプロセッサにはメモリが必須です．かつて半導体メモリが非常に高価だったころは，オブジェクト・サイズが小さいCISC（complex instruction set computer）アーキテクチャが主流（ほぼ100%？）でした．前述のTK-80には，ROM，RAMともに最大1Kバイト（標準はそれぞれ768バイト，512バイト）しか搭載できませんでした．

この時代はソフトウェアの開発ツールなどは何もありませんでした．ノートに自分で罫線を引いたコーディング用紙にアセンブリ言語で書き込んだソース・コードを，CPUの命令セット・マニュアルを片手に人手で機械語に変換（ハンド・アセンブル）して，オブジェクト・コードを作成します．とくに相対分岐のオフセット計算は，まちがい＝マイコン暴走につながるので注意が必要でした．

机上デバッグが終わると，マイコンをHALT（クロックは供給されているが，実行を停止してバスを解放した状態）して，オブジェクト・コードをメモリへ直接書き込んだ後，HALT解除＋リセットで実行させていました．たいへんな手間と時間が必要でしたが，このステップを何回も繰り返し，ソフトウェアを入れ替えるだけでいろいろな動作をするマイコンのイロハを学びました．

TK-80の出現からわずか2年後の1978年夏，日本電気から日本メーカとしては初のパーソナル・コンピュータ（パソコン）である「PC-8001」が発売（当時168,000円）されました．CPUは「μPD780C」というZ80互換品で，メモリはROM，RAMともに最大32Kバイト（標準はそれぞれ24Kバイト，16Kバイト）を搭載していました．8ビット・マイコンのアドレッシング可能な空間すべてをサポートし，さらにN-BASICというインタプリタが組み込まれていました．そのため，電源をONすると“ピー”というビープ音に続いて，CRT上にCopyrightメッセージが出力され，すぐにBASICマシンとして使えました．同時期に発刊されていたパソコン雑誌には，ゲームやツールが毎月掲載されました．言語を理解していなくても誌上のソース・コードをそのまま入力すればプログラムが動作するので，同じ機種を持っている友人たちと入力の速さと正確さを競ったりしていました．

その後，パソコンは多くのメーカから発売されるようになりました．32ビット時代の初めまで一世を風靡（ふうび）したPC-9801を経て，米国Microsoft社のWindowsの登場とともに，IBM PC AT互換機に主流が移り，現在に至っています．

● 組み込み機器が出現

パソコンによってマイコンの可能性が一般に知られるようになると，専用装置にマイコンを搭載しようという動きが出てきました．

今では組み込み機器と呼ばれていますが，当時は「マイコン応用システム」というのが一般的な呼び名でした．パソコンでは拡張の自由度が低かったため，S100バスやマルチバスなど，仕様が標準化されたバスを採用したCPUボードやI/Oボードなどの市販品を購入し，必要に応じて独自のメモリやI/Oを追加するなど，どのように使えるかを評価するところから開発作業が始まりました．アドレス・デコーダやウェイト生成，DMAコントローラなど，マイコンの基本動作のすべてがそこにありました．

用途としては，小型計算機としての活用が多かったのは当然ですが，「マイコン＋ソフトウェア」構成の柔軟性が認知されるに従い，さまざまな制御アプリケーションでも使用されるようになってきました．安価な4ビット・マイコンを組み込んで機能アップを図った量産家電品や，ソフトウェアによるシーケンス制御（PLC：Programmable Logic Controller）などが続々登場しました．

家電品では，それまで決められた処理をただ順番に実行することしかできなかったものが，制御対象からセンサで取り込んだ情報をもとに処理内容を切り替えたり，制御関数のパラメータとして使うなど，きめ細かい制御ができるようになりました．ファジィ制御は家電品の質を飛躍的に向上させたと言っても過言ではありません．また，各制御対象で個別に処理していた内容も，マイコンの高性能化によって現在では集中制御が可能となり，より複雑な制御を容易に実現しています．

一方PLCでは，リレーとタイマの組み合わせで実現していたラダー制御を，すべてマイコンのプログラムに置き換えられるようになりました．ラダーが追加されてもハード

ウェアの増加を伴わないので，システムを小型化でき，故障率も激減しました．また，シミュレータによるデバッグで開発工数の大幅な削減を達成するなど，シーケンサを搭載するシステムではすぐに重要な構成要素となりました．

このように「マイコン＋ソフトウェア」の組み合わせは，マイコンの高機能化，高性能化もあいまって，組み込み機器のさまざまな課題を乗り越えるために不可欠な実装手段となり，現在に至っています．

● マルチチップから1チップ，そしてSOCへ

マイクロプロセッサが出始めた当初は，1チップが1機能（4004と8008は複数のチップで一つのCPU機能を構成）で，システムを構成するには複数個のLSIが必要でした．しかし，10μm程度のプロセスから始まったマイクロプロセッサも，しだいに微細化（高集積化）が進み，2～3μmプロセスになると8ビットCPUに周辺機能を取り込んだ1チップ・マイコンが出始めました．このころはチップ面積に占めるCPUの割合がいちばん大きかったのですが，サブミクロン時代に入り，少ない論理で実現できて高速化も容易なRISC（reduced instruction set computer）が主流になると，CPUよりも周辺モジュールの割合が大きくなりました．特定用途向けLSIの設計においてもマイクロプロセッサが活用されるようになり，システムLSIが登場します．面積比では，メモリ＞周辺モジュール＞CPUとなる傾向が強くなっています．すでに始まっているディープ・サブミクロンの時代には，アナログ機能だけでなく，RF機能をも同一シリコン上に集積したミックスト・シグナルLSIも珍しくなくなっています．システムの1チップ化がより進んでいくことでしょう．

● ファブレス・メーカが登場

LSIは設計から製造まで同一メーカ内で行うもの，つまり製造設備に投資できるメーカがLSIを開発・販売するという時代から，現在はシリコン・ファウンドリと呼ばれる専門会社がLSIを製造する時代へと変わっています．複数メーカからの生産受託により製造ラインの稼働率を上げ，早期に自社の設備投資を回収して利益を上げようというファウンドリのビジネス・モデルは成功しています．初めは生産量調整用として使っていたメーカも，現在ではビジネス・パートナとして手を組むに至っています．

また，これらシリコン・ファウンドリが生産条件さえ合えばどこの製品でも対応することに目を付け，自社で生産設備を持たない半導体ベンチャ，いわゆるファブレス・メーカが出現しました．現在，組み込み機器でよく使われているFPGA（field programmable gate array）はファブレスで成功した製品です．

さらにアーキテクチャの開発に注力し，自社ではLSIをいっさい生産しない会社も登場しました．LSIメーカやASIC設計を行う機器メーカへの設計情報のライセンス販売に特化したIPコア・ベンダです．

IPコア・ベンダは，それぞれが持つ技術力で個性を示しています．なかでも英国ARM社は，CPUアーキテクチャの開発に特化して約20年の歴史を持ちます．同社の製品は，SOC向けのCPUコアとしてはデファクト・スタンダードになっていると言っても過言ではありません．

● SOCのマルチコア化，そしてその先に見えるもの

ARM以外にもCPUを中心に展開しているIPコア・ベンダが増えています．半導体メーカもライセンス提供に積極的に取り組み始めているので，SOCに搭載するCPUの選択肢が拡がっています．まもなく，異なるアーキテクチャのCPUを混載したマルチコアSOCがあたりまえになる時代が来ると思われます．

そうなると，求められるのはソフトウェア開発環境の統合化です．gcc＋gdbでは満足できず，ICE（in-circuit emulator）とも緊密に連携する，より高度な環境が必要になるでしょう．筆者はEclipseに注目しています．

● 付属基板について

本誌の付属基板に搭載されている「ADuC7026」は，米国Analog Devices社によれば，「ARM7コアを備えた精密（正確）なアナログ・マイクロコントローラ（Precision Analog MicroController with ARM7 Core）」です．

CPUコアはARM7TDMIという，SOCでは標準的なアーキテクチャが用いられています．ARM経験者であれば，新しいアーキテクチャを覚えることなく使うことができるでしょう．また，ARM未経験者にとっては，標準アーキテクチャを身につける教材として役立ちそうです．論理回路設計者にとっては，16エレメントのPLA（Programmable Logic Array）が興味深いでしょう．

ふじむら・まさし　組み込みシステム・エンジニア